

ЭКРАНИРОВАНИЕ ПОДЗЕМНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПЛОСКОГО ФЕРРОМАГНИТНОГО ЭКРАНА

Кучерявая И.Н., докт.техн.наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина. E-mail: rb.irinan@gmail.com

Методом компьютерного моделирования исследованы особенности распределения магнитного поля вокруг одноцепной подземной трехфазной кабельной линии с полиэтиленовой изоляцией на напряжение 330 кВ в случае применения плоского ферромагнитного экрана. Проанализированы зависимости уровня магнитного поля от глубины расположения экрана в грунте, его размерных характеристик, нелинейной зависимости магнитной проницаемости материала экрана от магнитной индукции. Библ. 10, рис. 5.

Ключевые слова: подземная трехфазная кабельная линия, ферромагнитный экран, магнитное поле, компьютерное моделирование.

Современные силовые кабели с полиэтиленовой изоляцией на высокое и сверхвысокое напряжения (до 500 кВ) создают в окружающей среде и, особенно в непосредственной близости, значительное магнитное поле. При использовании таких кабелей в черте крупных городов актуальной является проблема электромагнитной совместимости с окружающей средой. Решение этой проблемы предполагает, прежде всего, снижение негативного влияния магнитного поля на людей, биологические объекты, а также на расположенные вблизи коммуникационные сооружения [1, 2].

Наряду с путями снижения уровня магнитного поля промышленной частоты за счет геометрического расположения кабелей в кабельной линии и расстояния между ними [3, 4] распространенным способом является применение электромагнитных и магнитных экранов, в числе которых плоские (открытые) и замкнутые экраны [1, 4–6]. Экранирование кабельных линий может осуществляться на определенных их участках, например, проходящих вблизи густонаселенных районов, объектов со скоплением людей, а также на пересечении с коммуникациями.

Экранирование магнитного поля кабелей обеспечивается за счет поглощения электромагнитной энергии электропроводящим материалом экранов. При этом снижается уровень поля за пределами кабельной линии и изменяется конфигурация самого поля. Основными видами экранов являются магнитные экраны и электромагнитные экраны, изготовленные из материалов с высокой электропроводностью, которые могут обладать и магнитными свойствами (ферромагнитные экраны). Эффективность экранирования зависит в общем случае от электрофизических свойств материала экрана (удельной электропроводности и магнитной проницаемости), размеров и толщины экрана, его конструкции и расположения по отношению к кабелям.

Целью статьи является выявление закономерностей распределения магнитного поля вокруг одноцепной подземной кабельной линии на напряжение 330 кВ в случае применения плоского ферромагнитного экрана в зависимости от глубины его расположения в грунте, ширины, толщины, заданной магнитной проницаемости материала экрана как функции магнитной индукции.

Цель работы достигается путем компьютерного моделирования методом конечных элементов в программе Comsol [7]. Рассматривается кабельная линия, состоящая из трех одножильных кабелей с полиэтиленовой изоляцией, расположенных треугольником вплотную друг к другу (рис. 1). Экранирование выполняется с помощью горизонтально расположенной плиты, выполненной из ферромагнитного горячекатаного низкоуглеродистого материала Magnetil (электростали) с заданными свойствами [5].

Модель для исследования. Моделирование магнитного поля кабельной линии выполняется в стационарном режиме для двумерного случая при следующих предположениях.

Кабельная линия является протяженной и проложенной параллельно поверхности земли на определенной глубине. Условия прокладки неизменны по всей трассе; металлические (медные) экраны силовых кабелей в кабельной линии заземлены с двух концов.

Источниками переменного магнитного поля являются трехфазные токи промышленной частоты, протекающие в жилах, и наведенные токи в экранах кабелей; иные источники поля вблизи линии отсутствуют. Для ослабления магнитного поля кабельной линии применяется достаточно тонкий ферромагнитный экран.

При принятых условиях задача расчета магнитного поля формулируется в декартовой системе координат в плоскости xOy (рис. 1) относительно комплексного векторного магнитного потенциала $\dot{\mathbf{A}} = (0, 0, \dot{A}_z)$, имеющего единственную z -составляющую $\dot{A}_z(x, y)$.

Модель для расчета магнитного поля основывается на уравнениях [8] и состоит из следующей системы интегродифференциальных уравнений:

- для области токопроводящих жил трех кабелей

$$j\omega\sigma_i \dot{\mathbf{A}} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = \sigma_i \Delta \dot{U}_i, \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

$$\int_{S_i} \dot{J}_z dS = \int_{S_i} (-j\omega\sigma_i \dot{A}_z + \sigma_i \Delta \dot{U}_i) dS = \dot{I}_i; \quad (2)$$

- для области металлических экранов трех кабелей, заземленных с двух концов,

$$j\omega\sigma_i \dot{\mathbf{A}} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0; \quad i = 1, 2, 3, \quad (3)$$

$$\int_{S_i} \dot{J}_z dS = \int_{S_i} -j\omega\sigma_i \dot{A}_z dS = 0; \quad (4)$$

- для области ферромагнитного экрана

$$j\omega\sigma_3 \dot{\mathbf{A}} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = \sigma_3 \Delta \dot{U}_3; \quad (5)$$

$$\int_{S_3} \dot{J}_z dS = \int_{S_3} (-j\omega\sigma_3 \dot{A}_z + \sigma_3 \Delta \dot{U}_3) dS = 0; \quad (6)$$

- для области грунта

$$j\omega\sigma_{gp} \dot{\mathbf{A}} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0; \quad (7)$$

- для области воздуха

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0. \quad (8)$$

В уравнениях: $\omega = 2\pi f$ – угловая частота тока; j – мнимая единица; σ_i – электропроводность i -ой проводящей среды (трех жил, трех экранов кабелей в кабельной линии) в рамках расчетной области (рис. 1); σ_3 , σ_{gp} – электропроводность ферромагнитного экрана и грунта соответственно; μ_0 и μ_r – магнитная постоянная и относительная магнитная проницаемость магнитного экрана соответственно; \dot{J}_z – z -составляющая плотности тока; S_i – площадь поперечного сечения i -ой проводящей среды; S_3 – площадь поперечного сечения ферромагнитного экрана; \dot{I}_i – комплексная величина тока в жиле i -го кабеля (полагается известной и равной току кабеля в номинальном режиме); $\Delta \dot{U}_i$ – падение напряжения в проводящей среде на участке единичной длины.

Отметим, что в области экранов значение $\Delta \dot{U}_i = 0$, поскольку рассматривается случай заземления экранов с двух концов, а падения напряжения на жилах одинаковы и смещены по фазе на 120° : $\Delta \dot{U}_i = \Delta \dot{U}_{\text{жс}} e^{j\theta}$, $\Delta \dot{U}_i = \Delta \dot{U}_{\text{жс}} e^{j2\pi/3}$, $\Delta \dot{U}_i = \Delta \dot{U}_{\text{жс}} e^{j4\pi/3}$ – соответственно на жилах фаз A , B , C . В этих выражениях $\Delta \dot{U}_{\text{жс}}$ задается из условия равенства токов в жилах номинальному значению.

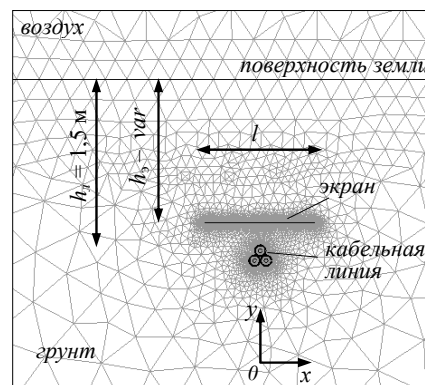


Рис. 1

В качестве граничных условий на всех внешних границах расчетной области выбирается условие магнитной изоляции

$$\dot{A}_z = 0. \quad (9)$$

Результаты компьютерных расчетов. С использованием математической модели (1)–(9) рассчитывалась кабельная линия 330 кВ с кабелями, расположенными в земле треугольником на глубине 1,5 м (рис. 1). Используемые в расчетах характеристики кабелей приведены в статье [9]. Номинальный ток кабельной линии равен 630 А.

Расчетная область состоит из подобластей с характеристиками грунта (электропроводность 10^{-3} См/м), воздуха, ферромагнитного экрана ($\sigma = 9,1 \cdot 10^6$ См/м, $\mu_r = 3000$, толщина 3 или 6 мм [5]), включает также элементы каждого из трех кабелей – алюминиевую жилу, медный экран, полиэтиленовую изоляцию и полиэтиленовую оболочку. Фрагмент расчетной области с нанесенной сеткой разбиения на конечные элементы показан на рис. 1. Последовательность фаз кабелей – ABC.

Изменение магнитной индукции $|\dot{\mathbf{B}}|$ вдоль поверхности земли для кабельной линии без экранирования и при наличии ферромагнитного экрана для глубины $h_3 = 0,3$ м представлено графиками на рис. 2. При толщине экрана $\Delta = 6$ мм для этих случаев $|\dot{\mathbf{B}}|_{\max} = 1,21$ и $0,68$ мкТ соответственно. Как видно, наличие магнитного экрана позволяет снизить максимальное значение магнитной индукции более чем в 1,7 раза.

На рис. 3 показано изменение магнитной индукции $|\dot{\mathbf{B}}|$ вдоль поверхности земли над кабелями при различной глубине расположения экрана в земле: $h_3 = 1,3$ м и $h_3 = 0,3$ м. Максимальные значения индукции составляют $|\dot{\mathbf{B}}|_{\max} = 0,64$ мкТ для $h_3 = 1,3$ м и $0,89$ мкТ для $h_3 = 0,3$ м. С приближением экрана к поверхности земли ($h_3 = 0,3$ м) поле возрастает в зонах над концами экрана, что объясняется проявлением краевого эффекта и данными рис. 4.

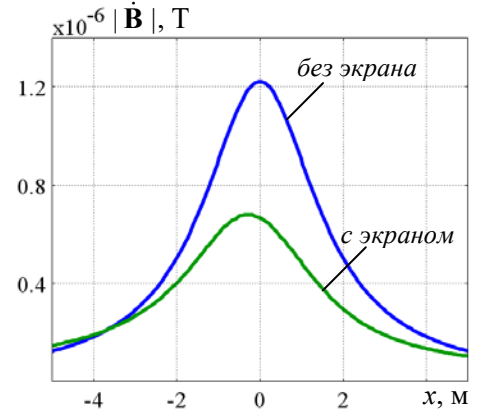


Рис. 2

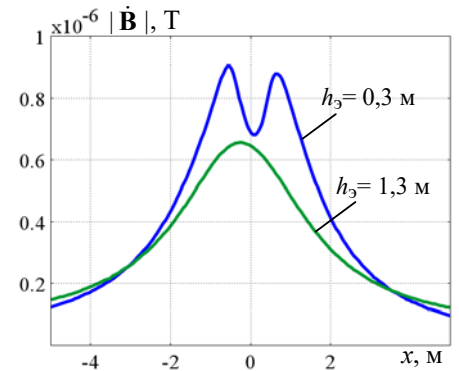


Рис. 3

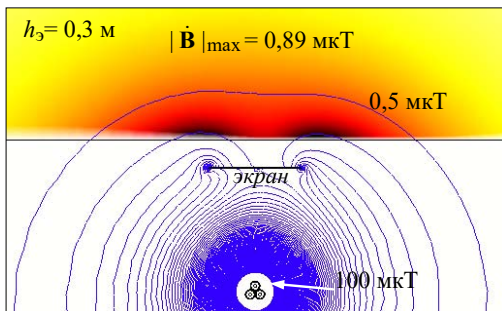


Рис. 4

В частности, на рис. 4 дано распределение магнитной индукции $|\dot{\mathbf{B}}|$ выше поверхности земли и во всем показанном фрагменте расчетной области контурными линиями, соответствующими значениям поля от 0,5 до 100 мкТ, при глубине расположения экрана $h_3 = 0,3$ м. Указано максимальное значение магнитной индукции выше поверхности земли $|\dot{\mathbf{B}}|_{\max} = 0,89$ мкТ, отображено сгущение изолиний поля в угловых зонах ферромагнитного экрана.

Эффективность экранирования магнитного поля кабельной линии в зависимости от ширины экрана и его толщины продемонстрирована на рис. 5. Здесь показано изменение

максимального значения магнитной индукции $|\dot{\mathbf{B}}|$ на поверхности земли над кабелями как функции ширины экрана l (рис. 5, а) и глубины его расположения в земле h_3 при различной толщине $\Delta = 3$ и 6 мм (рис. 5, б). С увеличением размера экрана значения магнитной индукции уменьшаются, при этом в указанном диапазоне ширины зона безопасных значений поля (0,5 мкТ [10]) над поверхностью земли не расширяется. Применение большего по толщине экрана $\Delta = 6$ мм немного более эффективно при небольшой глубине его расположения – до $h_3 = 0,3$ м. С большим заглублением экрана в грунт различия с тонким экраном ($\Delta = 3$ мм) стираются.

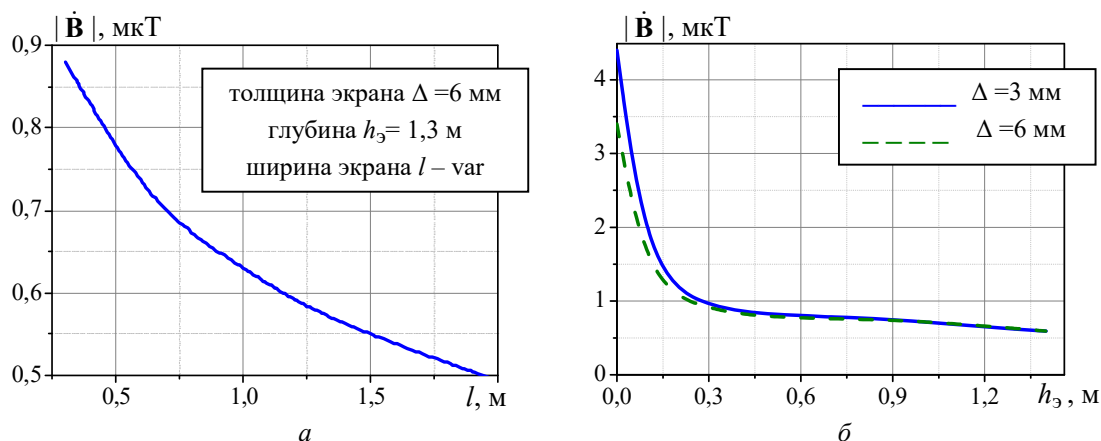


Рис. 5

Для исследования влияния магнитной проницаемости ферромагнитного экрана на значения магнитного поля использовалась зависимость $\mu_r(|\dot{\mathbf{B}}|)$ для материала Magnetil согласно [5]

$$\mu_r(|\dot{\mathbf{B}}|) = 10^3(-7,8|\dot{\mathbf{B}}|^4 + 20,8|\dot{\mathbf{B}}|^3 - 23,5|\dot{\mathbf{B}}|^2 + 15,2|\dot{\mathbf{B}}| + 0,25) \quad (10)$$

В соответствии с расчетными данными при задании $\mu_r = \text{const} = 3000$ для материала Magnetil и $\mu_r = \mu_r(|\dot{\mathbf{B}}|)$ согласно (10) относительная погрешность определения значений магнитной индукции на поверхности земли и выше для этих случаев составила около 1,5%.

Выводы. Исследованы особенности распределения магнитного поля за пределами одноцепной подземной трехфазной кабельной линии на напряжении 330 кВ с применением плоского ферромагнитного экрана, изготовленного из материала Magnetil, в зависимости от размерных факторов, глубины расположения экрана в грунте, магнитной проницаемости экрана от магнитной индукции.

Как показали расчеты, применение ферромагнитного экрана, расположенного на достаточно большой глубине (~1,3 м) вблизи кабелей и имеющего ширину не менее 1 м и толщину 3 мм позволяет снизить максимальные значения магнитного поля приблизительно в 1,7 раз.

Разработанные программные средства и подходы к исследованию магнитного поля подземных кабельных линий с применением магнитных экранов позволяют определять рациональные размерные параметры экранов, их расположение относительно кабелей, находить условия для обеспечения минимальных размеров зоны отчуждения в соответствии со стандартами относительно допустимого уровня создаваемого силовыми кабелями магнитного поля.

1. Доронин М.В., Грешняков Г.В., Коровкин Н.В. Магнитные экраны специальной конструкции. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. 2017. Том 23. № 1. С. 124–133. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.230112>

2. Machado V.M. Magnetic field mitigation shielding of underground power cables. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2012. Vol. 48. No 2. Pp. 707–710.

3. Кучерявая И.Н. Магнитное поле сверхвысоковольтной двухцепной кабельной линии с изоляцией из сшитого полиэтилена. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2019. Вип. 52. С. 13–17. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.52.013>

4. D'Amore M., Menghi E., Sarto M.S. Shielding techniques of the low-frequency magnetic field from cable power lines. *IEEE Internat. Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 18–22 Aug., 2003, Istanbul. 2003. Vol. 1. Pp. 203–208.

5. De Wulf M., Wouters P., Sergeant P., Dupré L., Hoflerlin E., Jacobs S., Harlet P. Electromagnetic shielding of high-voltage cables. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007. No. 316. Pp. 908–911. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2007.03.137>

6. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Магнитное поле подземной кабельной линии 330 кВ и способы его уменьшения. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 5. С. 3 – 9. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.003>

7. Comsol multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com/>

8. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Многомасштабное моделирование в электротехнике. Киев: Институт электродинамике, 2011. 255 с.

9. Лях В.В., Молчанов В.М., Сантоцкий В.Г., Квицинский А.А. Кабельная линия напряжением 330 кВ: некоторые аспекты проектирования. *Промэлектр.* 2009. № 6. С. 27–33.

10. Правила улаштування електроустановок. Мінпаливенерго України, 2010. 776 с.

УДК 621.315.23: 004.94

ЕКРАНУВАННЯ ПІДЗЕМНОЇ КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПЛОСКОГО ФЕРОМАГНІТНОГО ЕКРАНА

Кучерява І.М., докт.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна. Е-mail: rb.irinan@gmail.com

Методом комп'ютерного моделювання досліджено особливості розподілу магнітного поля навколо підземної трифазної кабельної лінії з поліетиленовою ізоляцією на напругу 330 кВ у разі застосування плоского ферромагнітного екрана. Проаналізовано залежності рівня магнітного поля від заглиблення екрана у ґрунт, його розмірних характеристик, нелінійної залежності магнітної проникності матеріалу екрана від магнітної індукції, взаємного розташування фаз кабелів у лінії. Бібл. 10, рис. 5.

Ключові слова: підземна трифазна кабельна лінія, ферромагнітний екран, магнітне поле, комп'ютерне моделювання.

SHIELDING OF UNDERGROUND EXTRA-HIGH VOLTAGE CABLE LINE BY PLANE FERROMAGNETIC SHIELD

Kucheriava I.M.

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine. Е-mail: rb.irinan@gmail.com

The computer modeling by finite-element method is used to study the features of magnetic field distribution around the underground single-circuit three-phase 330 kV cable line with polyethylene insulation when using a flat ferromagnetic shield. In the developed model, the three-phase currents running in cable conductors along with the currents induced in cable metallic shields are taken into account. The open-shield configuration is considered. The shield is made of the ferromagnetic hot-rolled low-carbon material Magnetil with specified electrophysical properties. The computed distributions of the magnetic field established by the cable line are obtained and discussed. The magnetic field level depending on the depth of the shield in the ground, the dimensions of the shield (including its width and thickness), the magnetic permeability of shield material as a function of magnetic flux density are analyzed. References 10, figures 5.

Key words: underground three-phase cable line, ferromagnetic screen, magnetic field, computer simulation.

1. Doronin M.V., Greshniakov G.V., Korovkin N.V. Magnetic shields of special design. *Nauchno-tekhni-cheskie ведомosti Sankt-Petersburgskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2017. Vol 23. No 1. Pp. 124–133.

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.230112> (Rus)

2. Machado V.M. Magnetic field mitigation shielding of underground power cables. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2012. Vol. 48. No 2. Pp. 707–710.

3. Kucheriava I.M. Magnetic field of extra-high voltage two-circuit cable line with XLPE insulation. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiki NAN Ukrainy*. 2019. Is. 52. Pp. 13–17. (Rus).

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.52.013>

4. D'Amore M., Menghi E., Sarto M.S. Shielding techniques of the low-frequency magnetic field from cable power lines. *IEEE Internat. Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 18–22 Aug., 2003. Istanbul. 2003. Vol. 1. Pp. 203–208.

5. De Wulf M., Wouters P., Sergeant P., Dupré L., Hoferlin E., Jacobs S., Harlet P. Electromagnetic shielding of high-voltage cables. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007. No 316. Pp. 908–911.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2007.03.137>

6. Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. The magnetic field of underground 330 kV cable line and ways for its reduction. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 5. Pp. 3 – 9. (Rus)

DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.003>

7. Comsol multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com/>

8. Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Multiscale modeling in electrical engineering. Kyiv: Instytut Elektrodynamiky NAN Ukrainy, 2011. 255 p. (Rus)

9. Lyach V.V., Molchanov V.M., Santatskii V.G., Kvitsinskii A.A. 330 kV cable line: some aspects of designing. *Promelektro*. 2009. No 6. Pp. 27–33. (Rus)

10. Electric installation code. Мінпаливенерго України, 2010. 776 p. (Ukr)

Надійшла 21.02.2019

Остаточний варіант 26.02.2019